

Verfahren zur Ermittlung von konstruktiven Erstmodelldaten für eine technische Leichtbaustruktur, Anwendungen des Verfahrens und mit dem Verfahren hergestelltes Erstmodell.

5

Beschreibung

Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur Ermittlung von konstruktiven Erstmodelldaten für eine technische Leichtbaustruktur, auf
10 Anwendungen des Verfahrens zur Erzeugung von Erstmodellen und auf ein mit dem Verfahren erzeugtes Erstmodell.

Die Verwendung von Vorbildern aus der Natur für technische Anwendungen ist seit langem bekannt und dem menschlichen Verhalten nahe gelegt. Die Natur
15 hat im Laufe der Evolution durch natürliche Auslese extrem energiesparende Konstruktionen und Verfahren als Antwort auf die Frage nach der besten Strategie im dauernden Überlebenskampf der Arten hervorgebracht, die für viele technische Anwendungen, wenn auch aus anderen Beweggründen, geeignet und wünschenswert erscheinen. Die Umsetzung scheitert dabei aber
20 in der Regel an der Problematik, das biologische System unmittelbar auf das gewünschte technische System anwendbar zu machen. Grundlage für eine solche Umsetzung muss einerseits das exakte Studium des morphologischen Aufbaus biologischer Systeme einschließlich der verwendeten natürlichen Materialien und ihrer Eigenschaften und andererseits der Erwerb genauer
25 Kenntnisse über deren Zweck, also den Gesamtzusammenhang des betrachteten Systems in seiner natürlichen Umgebung sein. Erst eine solchermaßen umfassende Aufklärung aus biologisch-technischer Sicht ermöglicht es dem Konstrukteur, technische Systeme unter Berücksichtigung biologischer Wirkmechanismen zu gestalten. Die Wissenschaft von der
30 systematischen technischen Umsetzung biologischer Konstruktionen und Verfahren in die technische Welt wird allgemein als Bionik oder Biomimetik bezeichnet.

Eine Vielzahl von Veröffentlichungen befasst sich mit der Ausdeutung solcher Prinzipien und der Darstellung des jeweiligen Standes der Technik. Die **Veröffentlichung I** (Werner Nachtigall, „Vorbild Natur – Bionik-Design für funktionelles Gestalten“, Springer Verlag, 1997) beschreibt die Grundprinzipien natürlicher Konstruktionen [I, S.21 ff]: Die Natur konstruiert nicht additive, auf einzelne Haupteigenschaften maximierte Komponenten, sondern entwickelt integrierte, im Hinblick auf die Summe seiner notwendigen Eigenschaften optimierte Systeme. In der Natur steht dem System der durch Nahrungsaufnahme erwerbbare Energie der energetische Aufwand zur Verteidigung/Flucht einerseits und der Fortpflanzung andererseits gegenüber. Je effektiver Energie eingesetzt werden kann, desto größer die Überlebenschance. Leichte und dabei stabile Bauweisen und detaillierte Anpassungen an unterschiedlichste Umweltbedingungen sind die Folge und stellen einen großen, für die Technik nutzbaren Designpool dar. Als bekanntes Beispiel für bionisches Design kann der Lotus-Effekt dienen [I, S.43-44]. Dabei konnte nachgewiesen werden, dass Oberflächen, z.B. von Blättern, mit einer definierten Verteilung von Mikrorauigkeiten die Anhaftung von Schmutzpartikeln und Wassertropfen sehr wirksam verhindern, indem Wassertropfen nicht flächig anheften, sondern durch ihre Oberflächenspannung auf den Spitzen der Rauigkeiten abrollen und dabei den ebenfalls nur auf den Spitzen der Rauigkeiten ruhenden Schmutz einrollen und mitnehmen. Diese Fähigkeit gestattet es den Pflanzen, sich effektiv selbst zu reinigen und dabei die zum Überleben wichtige Lichtausbeute auf hohem Niveau zu halten. Auf technischen Oberflächen kann dieser Selbstreinigungseffekt durch Beschichtung mit anderen, die Rauigkeit der Pflanzenblätter nachbildenden Materialien ebenfalls erzielt werden. Damit kann nicht nur der Reinigungsaufwand z.B. von Solarzellen zur Aufrechterhaltung der Lichtausbeute sondern auch von optischen Flächen wie Hausfassaden und Fensterscheiben deutlich reduziert werden. Es gibt eine Reihe weiterer Beispiele aus der Tierwelt, z.B. die Ausnutzung der strömungstechnischen und der Antifoulingseigenschaften von Walhaut, der

richtungsabhängigen Reibungserzeugung von Schlangenhaut usw. Für die technische Umsetzung solcher Analogien wird in der Veröffentlichung [I, S.127-130] die notwendige Modellbildung in dem Schritt Prinzip-Nullmodell-Endausführung (Abb.67) jedoch nicht näher beschrieben.

5

In der **Veröffentlichung II** (Claus Mattheck, „Design in der Natur – Der Baum als Lehrmeister“, Rombach Ökologie, 1997) [II, S.13-18, 45-47] wird der Mechanismus der biologischen Selbstoptimierung, d.h. der Optimierung des Energieeinsatzes, anhand des Beispiels des adaptiven Wachstums von

10 Bäumen behandelt. Durch die ständigen Veränderungen der Lebensbedingungen im Laufe seines Daseins unterliegt der Baumstamm unterschiedlichen Spannungsverhältnissen durch Wind, Sonne, Bodenbeschaffenheit usw. Die genetische Disposition des Baums befähigt ihn nun, ungünstigen Spannungsverteilungen durch unterschiedliches

15 Dickenwachstum zwischen gefährdeten und ungefährdeten Stellen entgegenzuwirken. Er verfolgt immer das Ziel, im zeitlichen Mittel auf der gesamten Oberfläche des Baumstamms konstante Spannung wirken zu lassen. Dieselben Verhältnisse gelten auch für andere, mechanisch hochbelastete Bauteile der Natur wie Knochen, Zähne, Krallen usw. Das

20 zugrunde liegende Prinzip, das Axiom von der konstanten Spannung, kann als Grundlage für biologisch-technisches Konstruieren betrachtet werden. Auch hier zeigt sich wieder, dass das energieoptimierte Design der Natur, d.h. bei für den vorgesehenen Einsatzzweck notwendigen Krafteinleitungen durch Weglassung von spannungsfreien Zonen minimiertem Bauteilgewicht,

25 Vorbildfunktionen für ökologisch und wirtschaftlich optimierte technische Strukturen erfüllt. Bei der Beschreibung der Vorgehensweise zur Umsetzung ökologischen Designs [II, S.63, 64], von der die Erfindung als nächstliegendem Stand der Technik ausgeht, werden die anwendbaren Methoden und deren Zusammenwirken kurz dargestellt. Die technische Aufgabenstellung liefert

30 zunächst die relevanten Grundparameter für die herzustellende technische Struktur einer Konstruktion. Hierbei handelt es sich beispielsweise um die ungefähre Bauteildimension (Grenzabmessung), die angreifenden äußeren

Belastungen und die Randbedingungen (Einspannung, Auflager, Führungen etc.). Die Mechanik liefert z.B. mit der Finite-Element-Methode (FEM) als numerischem Handwerkszeug die auftretenden Spannungen, Dehnungen und Verformungen in der technischen Struktur. Mit der so genannten Soft Kill
5 Option (SKO) können dann nichttragende Konstruktionsbereiche als unnötiger Ballast beseitigt werden. Somit kann ein voroptimierter Leichtbaudesignvorschlag als Erstmodell zur Verfügung gestellt werden, das aber noch Problemzonen aufweist. Diese können mit der so genannten Computer Aided Optimization (CAO) durch weiteres Schrumpfen und
10 Verändern der Konstruktion nachbehandelt werden, sodass durch einen iterativen Optimierungsprozess schließlich die zu erstellende Konstruktion mit einer dauerfesten Leichtbaustruktur entsteht. Dabei hängt der Umfang des Optimierungsprozesses direkt von der Qualität des Erstmodells ab. Je näher dieses bereits an der fertigen Endkonstruktion liegt, desto geringer ist der
15 Optimierungsaufwand. Insgesamt sind jedoch nur relativ einfache Strukturen umsetzbar, und schon die Erstellung des datenbasierten Erstmodells nach dem Vorbild aus der Natur erfordert im Stand der Technik langwierige Übertragungs- und Rechenprozesse. Abhilfe bietet hier bislang nur die Verwendung sehr einfacher Erstmodelle, wodurch sich der Rechenaufwand
20 aber nur auf die Optimierung an der endgültigen Konstruktion verlagert, da die Abweichung zum Erstmodell sehr groß ist.

Die Veröffentlichung III (Hamm, Merkel, Springer, Jurkojs, Maier, Prechtel, Smetacek, „Architecture and material properties of diatom shells provide
25 effective mechanical protection“, Nature, Vol.421, S.841-843, Feb.2003) beschäftigt sich mit dem speziellen und vielfältigen konstruktiven Aufbau von Diatomeen (Kieselalgen) als Schutzeinrichtung. Insbesondere im Hinblick auf mechanisch beanspruchte Leichtbaustrukturen für Konstruktionen im Maschinenbau oder mechanisch-ästhetische Schöpfungen der Architektur
30 können die Schalenkonstrukte biomineralisierte Einzeller, und hier besonders der *Bacillariophyceen* (Diatomeen, Phytoplankton) und *Phaeodarien* (Radiolarien, Zooplankton) eine entscheidende Vorbildrolle spielen. Hier ist

- eine große Vielfalt von Strukturen gegeben, deren Hauptaufgabe im Schutz gegen mechanische Belastung und Zerstörung im funktionellen Kontext mit ihren Nahrungskonkurrenten und Fressfeinden bei gleichzeitiger Minimierung ihres Gewichts, d.h. Optimierung des Energieeinsatzes, besteht. Es sind ca.
- 5 60000 Arten Kieselalgen in zwei Ordnungen bekannt, die aufgrund ihrer Schalengeometrie in zentrische (centrales) und pennate (pennales, bogenförmige) unterschieden werden. Die skelettartigen Stützgerüste der Kieselalgen sind aus Kieselsäure gebildet, den Sauerstoffsäuren des Siliziums $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Je nach Wasseranteil spricht man von Ortho-, Orthodi- oder
- 10 Metakieselsäure. Ohne Wasser bleibt Kieselsäureanhydrid SiO_2 übrig. Kieselalgen erzielen mit einem Minimum an Material ein Maximum an Stabilität und haben somit die gleiche Zielsetzung wie moderne Leichtbaukonstruktionen. Als Hintergrund seien noch die Internet-
- Veröffentlichung IV** („Wunderschöne Kieselalgen: Muster für stabile
- 15 Konstruktionen“, Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, http://www.awi-bremerhaven.de/AWI/Presse/PM/030219_diatomeen-d.html) mit einigen technischen Daten zu Diatomeen und die Internet-**Veröffentlichung V** („Jugendstil im Meer“, Forschungszentrum Jülich, [http://fz-](http://fz-juelich.de/portal/index.php?jahr=2003&index=281&cmd=show&mid=125)
- 20 [juelich.de/portal/index.php?jahr=2003&index=281&cmd=show&mid=125](http://fz-juelich.de/portal/index.php?jahr=2003&index=281&cmd=show&mid=125)) mit Fotos zu der Standardtestmethode mit Glasnadeln zur mechanischen Festigkeit von biomineralisierten Einzellern genannt.

- In der klassischen Konstruktion wird zunächst eine den technischen Anforderungen der zu erstellenden Struktur möglichst weit angenäherte
- 25 Zeichnung erstellt. Dazu ist ein auf diesem technischen Gebiet versierter Konstrukteur erforderlich. Die konstruierte Struktur wird anschließend als Erstmodell mit geeigneten Fertigungsmethoden hergestellt und geprüft. Erfüllt sie die gestellten Anforderungen, d.h. hält sie den Belastungen für die gewünschte Lastspielzahl und/oder Lebensdauer ohne die Funktion
- 30 beeinträchtigende Veränderungen stand, wird sie umgesetzt und geht so gegebenenfalls in Serie. Anderenfalls wird sie an den kritischen Stellen verstärkt. Eine Schwächung an überdimensionierten Stellen erfolgt hier nicht,

- da diese in der Regel nicht bekannt werden. Ein fortschrittlicher Konstruktionsprozess optimiert die Struktur, indem ein FEM-Modell erzeugt und am Computer unter den geforderten Stresssituationen getestet und gegebenenfalls verbessert wird. Regelmäßig erfolgt hier aber auch nur ein
- 5 Spannungsabbau durch Verstärkung. Die Methode dient nicht der Optimierung im allgemeinen, d.h. ökologisch-energetischen Sinne, sondern verfolgt das Ziel, Versuch-und-Fehler-Schritte zu vermeiden und stellt somit nur eine Optimierung in Hinsicht auf die Entwicklungszeit dar. Darüber hinaus werden in der klassischen Konstruktionslehre kaum jemals ganze Systeme aus mehreren
- 10 Bauteilen optimiert. Aus den Veröffentlichungen I, II und III wird aber deutlich, dass es im allgemeinen Interesse liegen muss, energetisch optimierte Strukturen, insbesondere Leichtbaustrukturen, zu entwickeln. Mit den herkömmlichen Methoden ist dieses Ziel nur mit hohen Aufwendungen an Rechenzeit und -kapazität möglich. Es wird also erkennbar, dass ein ganz
- 15 entscheidender Schritt zur ökologischen Entwicklung mechanisch hoch belastbarer Strukturen die Erstellung des Erstmodells darstellt. Je näher ein solches Erstmodell an die geforderten Bedingungen heranreicht, desto einfacher ist die Anpassung und Optimierung auf eine rationell fertigbare, energetisch optimale Konstruktion. Dies ist einem Konstrukteur höchstens auf
- 20 einem jeweils sehr eng begrenzten Spezialgebiet und nur für einzelne Bauteile oder sehr einfache Systeme möglich. Hochgenaue Erstmodelle komplizierter Strukturen auf den unterschiedlichsten Gebieten können so also nicht erstellt werden.
- 25 In der deutschen Offenlegungsschrift **DE 100 53 299 A1** („Verfahren zur Konstruktion eines Bauteils und Wischanlagenbauteil“) wird beispielhaft das Vorgehen zur Konstruktion von mechanischen Teilen mit rechnerunterstützten Methoden dargelegt. Die Verfahrensschritte umfassen eine gegenständliche Modellkonstruktion (Designraummodell), Beschreibung des Modells mit finiten
- 30 Elementen und Einsatz eines 3D-Programms zur Erstellung eines Datenmodells. Weiterhin werden Verfahrensschritte zur Topologie- und Shape-, d.h. Form-Optimierung angegeben. Die Anmeldung zeigt exemplarisch, wie

aufwändig der Erwerb von Daten für ein Erstmodell ist. Die Methodik, ein gegenständliches Modell zu erzeugen und dann eine Zeichnung, d.h. heute häufig ein Datenmodell, oder umgekehrt, zunächst eine Zeichnung und dann, ggf. rechnerunterstützt, ein gegenständliches Modell, um anschließend
5 numerische Optimierungen anzuwenden, kommt in einer Vielzahl von Varianten zum Einsatz, ohne Ansätze für den verbesserten Erwerb von Erstmodelldaten zu bieten.

Die genannten Veröffentlichungen geben kein rationelles Verfahren zum
10 Erstellen eines geeigneten Erstmodells an, mit dessen Hilfe die erforderliche Optimierungsarbeit an einer energetisch besonders vorteilhaften Leichtbaustruktur minimiert werden kann. Der unmittelbare Schritt vom technisch-biologischen Studium natürlicher Architekturen und Verfahren im Rahmen von bionisch ausgelösten Analogieuntersuchungen wird nicht
15 beschrieben, ist also dem zweckgerichteten interdisziplinären Team von Biologen und Technikern überlassen. Das zu wählende Verfahren richtet sich dabei nach dem Gegenstand der Untersuchung und den technischen Möglichkeiten der Beteiligten. Eine verallgemeinerte Methodik, die sich auf viele verschiedene Anforderungsprofile anpasst, wird nicht vorgestellt. Es ist
20 daher die **Aufgabe** der vorliegenden Erfindung, ein Verfahren zur Erstellung von Erstmodelldaten für eine technische Leichtbaustruktur anzugeben, das besonders rationell, aber trotzdem zuverlässig arbeitet. Das anzugebende Verfahren soll zeitlich und wirtschaftlich so effektiv wie möglich Erstmodelldaten zur Verfügung stellen, mit deren Hilfe ein den technischen
25 Anforderungen an die zu erstellende Leichtbaukonstruktion gut angenähertes Erstmodell erstellt werden kann.

Die **Lösung** stellt das erfindungsgemäße Verfahren mit folgenden Verfahrensschritten dar:

- 30 1. Bereitstellung der relevanten Grundparameter der zu erstellenden technischen Leichtbaustruktur in Bezug auf die technische Problemstellung,

2. Vorauswahl von einem oder mehreren biomineralisierten Einzellern mit zu den bereitgestellten Grundparametern passenden natürlichen Schalenarchitekturen,
 3. Auswahl von einer oder mehreren Feinstrukturen der für eine technische Realisierung aussichtsreichsten Bereiche der vorausgewählten Schalenarchitekturen,
 4. direkte Abnahme der konstruktiven Daten von den ausgewählten Feinstrukturen,
 5. Skalierung der abgenommenen konstruktiven Daten auf die Grundparameter der zu erstellenden technischen Leichtbaustruktur,
 6. Kombination und Anpassung der skalierten konstruktiven Daten zu eine Satz von Erstmodelldaten für ein Erstmodell der zu erstellenden technischen Leichtbaustruktur und
 7. Optimierung des Erstmodells.
- Zur Lösung der gestellten Aufgabe bietet sich der Reichtum an Formen, Funktionen und Verfahren der Natur mit ihren auf evolutionäre Weise erworbenen Erfahrungen an. Die Schalenarchitekturen der biomineralisierten Einzeller verfügen dabei über einen besonders großen Fundus an technisch relevanten Varianten. Nach Werner Nachtigall, einem der Begründer der wissenschaftlichen Bionik, liefert die Natur zwar keine unmittelbar verwendbaren Vorlagen für den technischen Einsatz. Vielmehr muss das biologisch-technische Studium der natürlichen Strukturen ein Verständnis für die Lösungswege der betrachteten Organismen liefern und dieses dann auf das technische Problem angewendet werden. Das erfindungsgemäße Verfahren stellt dieses Prinzip auch nicht in Frage, sondern greift aus der Vielzahl der möglichen Organismen lediglich eine große, aber hinsichtlich seiner grundsätzlichen Eigenschaften eng begrenzte Gruppe heraus, schafft damit einen ebenfalls eng begrenzten Bereich der Untersuchungsmethodik und bezieht deren verallgemeinerte Vorgehensweisen mit ein. Dadurch wird ein

Pool von Vorlagen bereitgestellt, der zwar nicht unmittelbar zugänglich ist, jedoch mit Hilfe des rezeptartig eingesetzten Verfahrens rationell angewendet werden kann. In Kenntnis der an die zu schaffende Leichtbaustruktur gestellten Anforderungen werden zunächst die gewünschten Eigenschaften definiert. Mit diesen wird eine Vorauswahl an geeigneten biomineralisierten Einzellern getroffen. Aus der Auswahl wird mit weiteren gewünschten Eigenschaften eine weitere Auswahl von Unterstrukturen und einzelnen Strukturelementen getroffen. Deren konstruktive Daten werden direkt ermittelt, die diversen Elemente kombiniert und eine Anpassung der Grenzbereiche vorgenommen. Die so entstandene integrierte Struktur wird nach den allgemeinen Regeln der Mechanik auf die geforderten Maße skaliert und damit die Daten für ein Erstmodell in einfacher Weise bereitgestellt. Ein aufwändiges Berechnen der Erstmodelldaten entfällt somit und der zeitliche und kapazitive Rechenaufwand verringert sich bedeutsam. Ein anschließend angewendetes Optimierungsverfahren sorgt für die Ausgestaltung bis zur gewünschten technischen Leichtbaustruktur. Besonders vorteilhaft ist der zumindest halbautomatische Erwerb von konstruktiven Daten anhand standardisierter Untersuchungsmethoden. Der Einsatz numerischer Verfahren zur Speicherung und Auswahl von Datensätzen der biomineralisierten Einzeller, ihrer Schalenarchitekturen und deren konstruktiver Daten einerseits sowie der Daten zu den Methoden der Skalierung, Kombination und Anpassung, der Erstmodelle und deren Optimierungsergebnissen andererseits ist ebenfalls besonders vorteilhaft. Nähere Einzelheiten zum erfindungsgemäßen Verfahren und seinen vorteilhaften Weiterbildungen sind dem speziellen Beschreibungsteil zu entnehmen.

Nachfolgend wird die Erfindung in ihrem gesamten Umfang anhand der schematischen **Figuren** zu ihrem weiteren Verständnis näher erläutert. Dabei zeigt:

- Figur 1** ein Blockdiagramm des Verfahrens,
- Figur 2** Schalenstrukturen von Diatomeen,
- Figur 3** Schalenstrukturen der Diatomeen *Asterolampra* (links),
 5 *Asteromphalus* (zweimal Mitte) und *Arachnoidiscus* (rechts)
- Figur 4** eine SEM-Aufnahme (links), ein CAD-Modell (Mitte) und ein FE-Modell (rechts) von *Arachnoidiscus*,
- Figur 5** ein Erstmodell für eine Leichtbaufelge in frontaler Vorderansicht mit einem Ausschnitt,
- 10 **Figur 6** das Erstmodell in perspektivischer Rückansicht mit einem Ausschnitt,
- Figur 7** das Erstmodell in perspektivischer Seitenansicht mit einem Ausschnitt,
- Figur 8** Schalenstrukturen von *Phaeodarien* (ungeeignet),
- 15 **Figur 9** Schalenstrukturen von *Phaeodarien* (geeignet),
- Figur 10** Details zum inneren Aufbau der Schalen der *Phaeodarien*
- Figur 11** ein Erstmodell für einen Leichtbaustoff als Flächenmodell (links) und als Linienmodell (rechts)
- Figur 12** Details zum inneren Aufbau der Schalen der *Coscinodiscus*
 20 *wailesii*
- Figur 13** ein Erstmodell für eine permeable Leichtbauschale als fraktales Schichtenmodell (links) und im Ausschnitt (rechts)

Bei dem im Blockdiagramm gemäß der **Figur 1** dargestellten **Verfahrensschritt 1** wird die gewünschte technische Leichtbaustruktur bezüglich ihrer
 25 Eigenschaften in Bezug auf die technische Problemstellung genau beschrieben. Als Grundlage dafür können gemeinsame beschreibende Eigenschaften technischer Leichtbaustrukturen und Schalenarchitekturen biomineralisierter Einzeller als organisierte Sammlung von Aspekten und
 30 Aspektwerten in einer Datenbank abgelegt sein. Zur Beschreibung der Eigenschaften wird dann ein nach informationstechnischen Gesichtspunkten

indizierter Aspektkatalog verwendet, dessen Elemente wohldefinierte Werte annehmen können. Je umfassender ein Aspektkatalog angelegt ist und je besser es gelingt, den gesamten betrachteten Problembereich damit abzudecken, desto genauer kann das jeweils spezielle technische Problem beschrieben werden. Im Zuge häufiger Verwendung kann ein gut gepflegter Aspektkatalog wachsen und immer präziseren Anforderungen gerecht werden. Im vorliegenden Fall der Ermittlung von Erstmodelldaten technischer Leichtbaustrukturen spielen unter anderem Aspekte der Begrenzung des Raums, in dem sich die Konstruktion bewegen darf, der statischen und dynamischen Belastung der Struktur, sowie Vorgaben bezüglich der Gewichtsrelationen von Bauteilen oder ästhetische Gesichtspunkte eine wichtige Rolle.

Für die Lösung ähnlicher Aufgaben kann erwartet werden, dass bereits verwendete Unterstrukturen erneut zum Einsatz kommen können. Für eine Erstmodellerstellung einmal gefundene Daten können in wirtschaftlicher Weise wieder verwendet werden, wenn eine Hierarchie von aufeinander aufbauenden und kombinierbaren Unterstrukturen vorgehalten wird. Auf diese Weise können je nach Erfordernis kleine oder größere, in der Hierarchie höher stehende Unterstrukturen beliebig kombiniert und die Erstmodellerstellung beschleunigt werden. Im **Verfahrensschritt 2** kann mit Hilfe eines anhand einer genauen Definition des technischen Problems mit passenden Werten gefüllten Aspektsatzes einer nach diesen Kriterien sortierbaren Menge von Feinstrukturen natürlicher Schalenarchitekturen eine passende Untermenge entnommen werden. Dazu kann vorteilhaft eine Ablage einer durch ihre bekannten Eigenschaften charakterisierten Hierarchie einzelner Strukturelemente, größerer Unterstrukturen und ganzer Schalenarchitekturen biomineralisierter Einzellern als organisierte Sammlung in einer Datenbank dienen. In diesem Verfahrensschritt 2 wird zunächst mit einer Grundmenge von Aspekten eine Vorauswahl getroffen. Steht für eine gewünschte Eigenschaft kein passender Aspektwert oder sogar kein passender Aspekt zur Verfügung,

muss eine nach den übrigen Kriterien ausgesuchte Untermenge von natürlichen Schalenarchitekturen für einen weiteren Überlegungsschritt herangezogen werden. Hierin wird festgelegt, wie eine Methode definiert werden kann, um die Erweiterung des Wertebereichs eines vorhandenen oder
5 die Ermittlung der Werte eines neuen, das aufgeworfene Teilproblem beschreibenden Aspekts zu ermöglichen.

Der **Verfahrensschritt 3** verfeinert die Suche nach geeigneten Feinstrukturen, indem er aus der Menge der prinzipiell geeigneten Schalenarchitekturen durch
10 eine eingegrenzte Untermenge von Aspekten oder weitere Einschränkung der Wertebereiche bestimmter Aspekte besonders geeignet erscheinende Schalenarchitekturen, Unterstrukturen oder Strukturelemente daraus bestimmt. Lösungen aus dem Bereich der hier betrachteten Schalenarchitektur biomineralisierter Einzeller für auftretende Grundfragen der technischen
15 Mechanik, z.B. der Spannungsverhältnisse in Problemzonen der gewünschten technischen Leichtbaustrukturen, können durch die aspektive Beschreibung als Katalog ständig wieder verwendbarer Teillösungen in einer Datenbank hinterlegt werden. Einzelne Strukturelemente, größere Unterstrukturen und Kombinationen daraus können in einer hierarchischen Weise aspektiert und
20 ebenfalls zur Wiederverwendung in einer Datenbank hinterlegt werden. Mit Hilfe der in den Verfahrensschritten 1 bis 3 dargestellten Methodik gelingt es, auf der Basis einer möglichst genauen und umfassenden Aspektierung des Problems aus den Datenbeständen schnell zu passenden Teillösungen zu gelangen. Es stehen dann auch die zugehörigen konstruktiven Daten der
25 ausgewählten Teillösungen zur Verfügung.

Sofern aus den Datenbeständen keine ausreichend genauen Teillösungen bestimmt werden können, müssen im **Verfahrensschritt 4** standardisierte Untersuchungsmethoden zur Bestimmung von mechanischen
30 Grundeigenschaften auf die bis zu diesem Schritt bestimmten übergeordneten

Strukturen, ggf. komplette Schalenarchitekturen angewendet werden. Dazu müssen im ursprünglichsten Fall neue biomineralisierte Einzeller im Bestand der Natur gefunden und katalogisiert oder bereits katalogisierte auf ihre Eignung und ihre konstruktiven Daten untersucht werden. Der Erwerb der konstruktiven Daten von den Feinstrukturen der Schalenarchitekturen ist ein 5 zeitaufwändiger Arbeitsgang. Daher kann das Verfahren nach der Erfindung vorteilhaft mit einer direkten Abnahme der konstruktiven Daten von den ausgewählten Feinstrukturen oder Unterstrukturen durch zumindest halbautomatisches mikroskopisches Scannen durchgeführt werden. Die Abmessungen der Schalenstrukturen liegen im Bereich von einigen 10 Nanometern für die unterste Hierarchieebene von Unterstrukturen bis über einen Millimeter für komplette Schalen. Für eine hochauflösende bildliche Darstellung kommen daher verschiedene elektronenmikroskopische Aufnahmeverfahren in Frage. Um dreidimensionale Strukturdaten zu erhalten, sind mehrere Aufnahmen aus verschiedenen Perspektiven oder 15 entsprechende räumliche Aufnahmesysteme erforderlich. Bei Kenntnis der Relationen der Aufnahmewinkel zueinander kann ein Rechenprogramm die digitalisierten Mikroskopie-Pixelbilder in Vektoren umrechnen und damit skalierbare Daten zur weiteren Verarbeitung in Richtung auf die gewünschte Erstmodellbildung liefern. Eine Möglichkeit zur Generierung von 3D- 20 Strukturmodellen besteht im Einsatz eines Laser-Konfokalmikroskops, das einzelne Schichten mikroskopischer Schalenstrukturen darstellt. Durch Rechenprogramme können daraus räumliche Darstellungen der originalen Strukturen rekombiniert und skalierbare Daten für die Erstmodellbildung bereitgestellt werden. Dabei ist es wiederum hilfreich, wenn die direkt 25 abgenommenen konstruktiven Daten als organisierte Sammlung in einer Datenbank abgelegt werden. Die Wiederverwendung der aufwändig erworbenen Daten ist nahe liegend, da zur Lösung immer wieder ähnlicher Probleme auch immer wieder gleiche oder ähnliche Unterstrukturen eingesetzt werden können. Stresstests, z.B. der Glasnadeltest (siehe Veröffentlichungen 30

III, IV, V), geben darüber hinaus Aufschluss über die mechanische Belastbarkeit der Schalenarchitekturen.

Im **Verfahrensschritt 5** werden die gewonnenen Daten auf die

- 5 Größenverhältnisse der zu erstellenden technischen Leichtbaustruktur skaliert. Im Falle von statischen oder quasistatischen Belastungsverhältnissen ist eine solche einfache Hochrechnung zulässig. Bei hauptsächlich stark dynamisch beanspruchten Teilen, deren Verhältnisse nicht durch quasistatische Annahmen oder direkte Analogien zu Schalenarchitekturfragmenten
- 10 angenähert werden können, müssen gegebenenfalls andere Skalierungsmethoden angewendet werden. Im **Verfahrensschritt 6** werden alle Unterstrukturen zu der gewünschten technischen Leichtbaustruktur zusammengefasst und die Stoßstellen geglättet. Das Ergebnis sind die Daten eines Erstmodells, das sehr eng an ein passendes Spektrum von
- 15 Naturvorlagen angelehnt ist und damit der angestrebten Leichtbaukonstruktion schon sehr nahe kommt. Auch hierbei ist eine Ablage von Kriterien für die Skalierung, die Kombination und die Anpassung der konstruktiven Daten, von Erstmodellen und deren Optimierungsergebnissen als organisierte Sammlung in einer Datenbank von Vorteil.

20

Im **Verfahrensschritt 7** schließlich wird das Erstmodell zu einem ausgereiften mechanischen System optimiert. Hierzu können unterschiedliche Optimierungsverfahren zum Einsatz kommen, z.B. die in der Veröffentlichung II bereits vorgestellten SKO- und CAO-Verfahren.

25

Ausführungsbeispiel 1 – Ermittlung eines Erstmodells für eine Leichtbaufelge

1. Bereitstellung der Grundparameter der zu erstellenden technischen Leichtbaustruktur in Form einer Leichtbaufelge

Die geforderte Leichtbaustruktur ist ein Rad, bestehend aus einem inneren Felgenkörper und einem damit verbundenen äußeren Felgenbett, wobei der Felgenkörper über Befestigungsmittel mit der Fahrzeugachse und das Felgenbett mit dem Reifen verbunden sind. Allgemein wird die Summe dieser Elemente als „Felge“ bezeichnet. Weiterhin soll diese Felge aus faserverstärktem Kunststoff mit anisotropen Materialeigenschaften bestehen.

Im vorliegenden Fall einer Leichtbaufelge ist eine Gewichtsreduzierung gewünscht, weil Felgen als ungefederte Massen möglichst leicht sein müssen, um besseren Bodenkontakt zu halten und auch auf unebener Fahrbahn effektiv zu haften. Eine besondere Herausforderung ist daher das Material, dessen Materialeigenschaften einen Einfluss auf die Auswahl geeigneter Geometrien hat. Da das Felgenbett und die Befestigungselemente genormt sind, sind Verbesserungen vor allem im Bereich des Felgenkörpers zu erzielen. Als zusätzliche Forderung ist eine gute Luftdurchlässigkeit in diesem Bereich zu nennen, um eine effektive Kühlung von Scheibenbremsen zu ermöglichen

2. Vorauswahl von biomineralisierten Einzellern mit passenden natürlichen Schalenarchitekturen

Aus den Organismen mit biologischen Leichtbauschalen (insbesondere planktonische, biomineralisierte Einzeller) wird die Gruppe der *Diatomeen* selektiert, da in dieser Gruppe Arten mit Schalengeometrien (vergleiche **Figur 2**) vertreten sind, die die fundamentalen Voraussetzungen für eine bionische Verbesserung eines Leichtbaurades erfüllen, also bereits relativ flach und

radartig sind. Sehr viele entsprechende Gattungen wie *Thalassiosira*, *Porosira* oder *Coscinodiscus* kommen als Lösungsansatz für die vorliegende Problemstellung dennoch nicht in Frage, da diese keine extrahierbaren Strukturelemente aufweisen. Als besonders geeignete Geometrien werden
5 dagegen die von zentrischen Kieselalgen wie *Asterolampra* (vergleiche **Figur 3**, links), *Asteromphalus* (vergleiche **Figur 3**, zweimal Mitte) und *Arachnoidiscus* (vergleiche **Figur 3**, rechts) ausgewählt, die jeweils radialsymmetrische, versteifende Strukturelemente enthalten. Kieselalgen sind in der Natur unterschiedlichen Belastungen ausgesetzt, die in ihrer Vielfalt den
10 Lastfällen ähneln, die auch an Felgen auftreten. Ein Selektionsdruck hin zu leichter Bauweise besteht außerdem wegen des limitierten Angebots an Baustoff (Silikat) sowie der Notwendigkeit, die Strukturen effektiv (schnell und mit wenig Energieaufwand) zu produzieren. Der Zwang, die Schalen leicht zu konstruieren ist zudem durch die planktonische (schwebende) Lebensweise
15 vieler Kieselalgen gegeben. Durch evolutive Anpassungsprozesse in ca. 200 Millionen Jahren haben die Kieselalgen ihre schalen als ultraleichte Defensivstrukturen ausgebildet, was zu hoch entwickelten, z.T. sehr komplexen Leichtbaustrukturen geführt hat. Wie FE-Berechnungen ergeben haben, bestehen die schalen der Kieselalgen aus einem anisotropen material
20 und erreichen dadurch maximale Festigkeit bei minimalem Materialeinsatz.

Kieselalgen sind als einzellige Organismen in der Regel unter einem Millimeter groß. Von Vorteil für die Übertragung in den technischen bereich ist dabei, dass die Form ihrer Schalen skalierbar ist, das heißt, sie kann
25 maßstabsgerecht vergrößert werden und behält trotzdem ihre spezifische Festigkeit, da Materialquerschnitt und Flächenbelastung beide mit dem Quadrat des Längenmaßstabes skalieren. Ihre Formen erscheinen zwar außergewöhnlich, aber nicht fremd oder skurril, sie sind im Gegenteil sehr harmonisch und ästhetisch. Wegen ihrer ausgewogenen Formen
30 widersprechen sie trotz einer im Felgenbau neuartigen Strukturierung auch

nicht unseren Sehgewohnheiten, was bei einem hochwertigen Massenprodukt wie einer Leichtbaufelge eine wesentliche Voraussetzung für die Annahme durch die Käuferschaft ist.

5 Trotz interessanter Lösungsansätze in den Schalenstrukturen all dieser Gattungen/Arten der *Diatomeen* bietet *Arachnoidiscus* eine bessere Umsetzbarkeit als *Asterolampra*, da der spätere Produktionsprozess für eine Leichtbaufelge Unterschneidungen, die bei *Asterolampra* vorherrschen, nicht zulässt. Die Gattung *Asteromphalus* besitzt radiär gewellte Schalen, die
10 ausschließlich aus einer mit sehr feinen Poren durchsetzten Schale gebildet wird. Wegen der geforderten Durchlässigkeit der Struktur kann diese Lösung nicht in Betracht gezogen werden. Auch im Hinblick auf die anisotropen Materialeigenschaften des faserverstärkten Kunststoffes sind die Strukturelemente von *Arachnoidiscus* von Vorteil, da die zu erwartenden
15 Spannungsverläufe in derartigen Strukturen im Wesentlichen den durch den Produktionsprozess vorwiegend erzeugten Faserverläufen angepasst sind (hohes Aspektverhältnis - Breite zu Tiefe - der auftretenden Rippen). Das dabei potenziell auftretende Problem der Knickung der sehr dünnen speichenartigen Elemente wird durch die in geringen Abständen angelegten
20 konzentrischen Elemente kompensiert. Die **Figur 4** zeigt links eine SEM-Aufnahme, in der Mitte ein CAD-Modell und rechts ein FE-Modell von *Arachnoidiscus*. In diesem Stadium des Ermittlungsverfahrens sind die Mittel- und Randbereiche der Strukturen noch an der Geometrie der Mikroalge orientiert, zudem ist die Struktur noch durch porenartige Ausfüllungen
25 geschlossen.

Teil der Vorauswahl von biomineralisierten Einzellern mit passenden natürlichen Schalenarchitekturen gemäß dem **Verfahrensschritt 2** ist auch die Durchführung mikromechanischer Tests zur Erfassung mechanischer
30 Eigenschaften. Mikromechanische Tests wurden bereits beispielhaft an

zentrischen Diatomeen (*Thalassiosira* und *Coscinodiscus*) durchgeführt. Durch diese Tests, bei denen die Schale von *Diatomeen* von einer Glasnadel unter ansteigenden Druck bis zur Zerstörung gesetzt wird, konnten generell günstige mechanische Eigenschaften von Schalen von *Diatomeen* nachgewiesen werden. Eine Bruchkraft von z.B. 300 μN bei *Thalassiosira* mit einer Größe zwischen 30 und 130 μm entspricht bei einer auf einen Quadratmeter hochskalierten Leichtbaukonstruktion einer Belastbarkeit von mehreren Hundert Tonnen.

10 **3. Auswahl von Feinstrukturen der aussichtsreichsten Bereiche der vorausgewählten Schalenarchitekturen**

Aus der Gesamtstruktur von *Arachnoidiscus* werden die internen Strukturen in den Valven, nicht jedoch die loculaten Areolen (wabenförmige Strukturen mit extrem kleinen Poren) ausgewählt, da es für die effektive Kühlung der Bremsscheiben notwendig ist, dass ein effektiver Luftaustausch zwischen Innen- und Außenseite des Felgenkörpers stattfindet. Der gerüstartige innere Aufbau besteht bei *Arachnoidiscus* aus radiären und konzentrischen Strukturelementen, deren Aspektverhältnis (Breite zu Tiefe einer Rippe) außerordentlich hoch ist.

20

4. Direkte Abnahme der konstruktiven Daten von den ausgewählten Feinstrukturen

Die konstruktiven Daten des Schalenaufbaus werden direkt aus licht- und rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen gewonnen und mit Hilfe von CAD- und FE- Programmen in 3D- Modelle transferiert.

25

5. Skalierung der abgenommenen Daten auf die Grundparameter der Leichtbaufelge

Die Skalierung erfolgt im Wesentlichen auf der Basis der Originalvorlage (*Arachnoidiscus*), wobei lediglich einige für die Produktion sinnvolle

30

Vereinfachungen, wie das Weglassen von Unterschneidungen und die Darstellung der Struktur als vollkommen radiärsymmetrisch, vorgenommen wurden.

5 **6. Kombination und Anpassung der skalierten Daten zu einem Satz von Erstmodelldaten für eine Leichtbaufelge**

Die radiären und konzentrischen Strukturelemente werden mit dem genormten Bereichen der Radbefestigung sowie Felgenhorn (Wulst an der Vorderseite des Felgenbettes) und -bett vereinigt und geglättet. Das daraus resultierende
10 Erstmodell wird so dimensioniert, dass es Berechnungen für einen direkten Vergleich mit einer aktuellen Leichtbaufelge mit bekannten Eigenschaften zulässt. Als Nebenaspekt wird auch das Design des durch das hier vorgestellte Verfahren erzeugten Erstmodells evaluiert, indem ein 1:1 Prototyp der Leichtbaufelge stereolithographisch produziert und optimiert wird. Weiter unten
15 werden unterschiedliche Ansichten des fertigen Erstmodells für eine Leichtbaufelge mit integrierter Leichtbaugeometrie auf der Basis der Topologie von *Arachnoidiscus* dargestellt.

7. Optimierung des Erstmodells für eine Leichtbaufelge

20 Anschließend werden die speziellen, für Leichtbaufelgen relevanten Lastfälle mit Hilfe vorgegebener Lastprogramme angewendet, um mit Hilfe von FE-Programmen und Optimierungssoftware eine letzte Anpassung des Erstmodells an die geforderten Leistungsmerkmale einer Leichtbaufelge vornehmen zu können.

25

Konkrete Ausführungsform des Erstmodells für eine Leichtbaufelge

Mit dem zuvor erläuterten Verfahren kann in sehr effizienter Weise ein Erstmodell einer Leichtbaufelge direkt aus dem konkreten Erscheinungsbild
30 von *Arachnoidiscus* entwickelt werden. Dabei besteht eine Leichtbaufelge für

ein Kraftfahrzeug aus einem inneren Felgenkörper, der einseitig an einer Achse befestigbar ist, und mit einem mit dem inneren Felgenkörper verbundenen äußeren Felgenbett. In speziellen Ausführungsformen weist der Felgenkörper einen tragenden Speichenaufbau auf.

5

Das mit dem vorgestellten Verfahren konzipierte Erstmodell für eine Leichtbaufelge zeichnet sich durch einen hochsymmetrischen und besonders filigranen Aufbau aus, der einen geringen Materialeinsatz ermöglicht und trotzdem durch den hohen Vernetzungsgrad eine hohe Festigkeit, insbesondere gegen Ausknicken der Speichen, garantiert. Im Speichenaufbau werden Radial- und Ringspeichen unterschieden. Dabei sind die Speichen rippenartig ausgeformt, sodass sie von der Erstmodellvorderseite her betrachtet nur einen geringen Raum einnehmen und später eine optimale Belüftung der hinter der nach dem Erstmodell hergestellten Leichtbaufelge liegenden Scheiben-

10 bremsen ermöglichen. Die Radialfelgen haben ein hohes Aspektverhältnis in der Breite der Rippen zu ihrer Tiefe. Die Form der Rippe ist damit schmal, aber tief resp. hoch, wodurch sich bereits ein Festigkeitsaspekt ergibt. Der zweite Festigkeitsaspekt ergibt sich aus der kreuzenden Überlagerung der Radialspeichen mit den Ringspeichen, sodass sich alle Speichen gegenseitig

15 abstützen. Es entsteht in Abhängigkeit von der Anzahl der Speichen ein hochsymmetrischer Gesamteindruck des Erstmodells nach der Art eines karierten Papiers mit einem durch die gewählte Rippengeometrie festlegbaren Maschenbild. Dabei wird dieses insbesondere auch dadurch geprägt, dass nicht alle Radialspeichen bis zur Felgenachse durchlaufen, sondern sich einige

20 radiale Radialspeichen nur jeweils über ein Drittel des Felgenkörpers vom Felgenbett her erstrecken. Diese enden dann gemeinsam an einer der äußeren Ringspeichen. Diese Maßnahme, die sich auf symmetrisch angeordnete Radialspeichen, beispielsweise jede dritte Radialspeiche, bezieht, erbringt später bei der Produktion einer Leichtbaufelge eine weitere Verringerung des

25 Felgengewichts, ohne dass die Leichtbaufelge dabei an Festigkeit einbüßt.

30

Das Erscheinungsbild des Speichenaufbaus wird aufgelockert, ohne dass dabei jedoch eine Unruhe entsteht.

Der Speichenaufbau kann völlig symmetrisch sein, wenn die Radial- und die
5 Ringspeichen gleichberechtigt ausgeprägt sind. Eine Ausführungsform des
Erstmodells kann aber auch durch ein geringeres Aspektverhältnis der Ring-
speichen gegenüber dem Aspektverhältnis der Radialspeichen gekennzeichnet
sein, wobei die Ringspeichen mit den Radialspeichen auf der Vorderseite
bündig oder nahezu bündig verlaufen. Somit ergibt sich ein spaltendominierter
10 Speichenaufbau, der eine besonders hohe radiale Festigkeit, insbesondere
gegen Ausknicken der Radialspeichen, aufweist, trotzdem aber auch
umlaufend ausreichend unterstützt ist. Dabei wird der optische Gesamt-
eindruck nicht gestört, wenn die flacheren Ringspeichen an der Vorderseite
des Felgenkörpers angeordnet sind, sodass sie bündig oder nahezu bündig mit
15 den Radialspeichen verlaufen und nicht nach hinten versetzt sind. Das direkt
aus dem konkreten Erscheinungsbild von *Arachnoidiscus* entwickelte
Erstmodell einer Leichtbaufelge kann durch 16 Radialspeichen und 6
Ringspeichen gekennzeichnet sein, wobei jede zweite Radialspeiche nur bis
zur zweiten Ringspeiche vom Felgenbett aus verläuft. Hierbei handelt es sich
20 um einen konstruktiven Aufbau, der sich durch theoretische und praktische
Untersuchungen als eine besonders vorteilhafte Ausführungsform für eine
Leichtbaufelge ergeben hat.

Weitere Modifikationen des Erstmodells können gekennzeichnet sein durch
25 Abrundungen zwischen den Radialspeichen auf der Seite des Felgenbettes
und durch eine konzentrische Kreisplatte im Bereich der Achsbefestigung des
Felgenkörpers, in die die Radialspeichen auslaufen. Derartige Modifikationen
dienen der weiteren Festigkeitssteigerung und können beispielsweise durch
Belastungssimulationsprogramme ermittelt werden. Außerdem verbessern sie
30 den optischen Gesamteindruck und die Handhabbarkeit der nach dem Erst-

modell hergestellten Leichtbaufelge. Durch die Abrundung der Zwischenräume ist später eine bessere Säuberung und durch die konzentrische Kreisplatte eine bessere Montage gewährleistet.

- 5 Die **Figur 5** zeigt ein Erstmodell **EM** für eine Leichtbaufelge für ein Kraftfahrzeug mit einem inneren Felgenkörper **FK** und einem damit verbundenen äußeren Felgenbett **FB**. Auf das Felgenbett **FB** wird im Fall einer realisierten Leichtbaufelge im Betrieb ein Reifen aufgezogen, der Felgenkörper **FK** weist eine zentrale Bohrung **ZB** auf, mit der er einseitig auf die Autoachse
- 10 aufgeschoben und mit mehreren Radbolzen durch dafür vorgesehen Bohrungen **BO** befestigt. Der Felgenkörper **FK** weist einen tragenden Speichenaufbau **SA** auf. Der Speichenaufbau **SA** ist hochsymmetrisch ausgeprägt und besteht aus einer Vielzahl von Radialspeichen **RAS** und Ringspeichen **RIS**. Beide Speichenformen sind als rechteckige Rippen
- 15 ausgebildet und sind relativ schmal, aber lang und tief. Die rippenartigen Radialspeichen **RAS** haben ein besonders hohes Aspektverhältnis. Sie sind sehr schmal ausgebildet und haben eine solche Tiefe, dass eine für den späteren Betrieb ausreichende Festigkeit und Stabilität der Leichtbaufelge erreicht werden kann. Die Tiefe der Radialspeichen **RAS** kann beispielsweise
- 20 im Bereich von einem Sechstel der Breite des Felgenbetts **FB** liegen. Gekreuzt werden die Radialspeichen **RAS** von mehreren konzentrischen Ringspeichen **RIS**. Diese sind umlaufend geschlossen und in einem konstanten radialen Abstand zueinander angeordnet. Im gewählten Ausführungsbeispiel werden 16 Radialspeichen **RAS** von 6 Ringspeichen gekreuzt. Es entsteht ein
- 25 engmaschiges Gitter hoher Stabilität. Die Ringspeichen weisen ein geringeres Aspektverhältnis auf als die Radialspeichen **RAS** und dienen in der Hauptsache zu deren Aussteifung. Um ein von der Vorderseite des Erstmodells **EM** her einheitliches Bild zu schaffen, liegen die Ringspeichen **RIS** an der Vorderseite des Felgenbetts **FB** und schließen bündig mit den
- 30 Radialspeichen **RAS** ab.

Die Hauptlast wird von den Radialspeichen **RAS** getragen. Dabei ist jedoch eine Durchgängigkeit aller Radialspeichen **RAS** bis zur zentralen Bohrung **ZB** nicht erforderlich. Es reicht eine maximale Aussteifung im Bereich des
5 Felgenbettes **FB** aus, weshalb im gewählten Ausführungsbeispiel jede zweite Radialspeiche **RAS** nur bis zur zweiten Ringspeiche **RIS** vom Felgenbett **FB** aus ausgeführt ist. Dadurch ergibt sich zusätzlich noch ein sehr symmetrischer Eindruck eines Felgenkranzes. Dieser wird noch unterstützt durch
10 Abrundungen **AB** zwischen den Radialspeichen **RAS** auf der Seite des Felgenbettes **FB**. Weiterhin ist im Bereich der Achsbefestigung des Felgenkörpers **FK** eine konzentrische Kreisplatte **KP** vorgesehen, in die die Radialspeichen **RAS** auslaufen und die das Gittermuster harmonisch abschließt. Die konzentrische Kreisplatte **KP** nimmt die Bohrungen **BO** für die Radbolzen auf und garantiert eine hohe Stabilität des belasteten Achsbereichs
15 der Leichtbaufelge **LF**.

Die **Figuren 6** und **7** zeigen das Ausführungsbeispiel des Erstmodells **EM** gemäß **Figur 5** in der Ansicht von hinten und von der Seite mit jeweils einem Ausschnitt. Die Bezugszeichen sind entsprechend der **Figur 5** zu entnehmen.
20 In der **Figur 6** ist zu erkennen, dass die Radialspeichen **RAS** und die Ringspeichen **RIS** nur an der vorderen Seite des Felgenbettes **FB** angeordnet sind. Zu erkennen ist auch das gegenüber den Ringspeichen **RIS** höhere Aspektverhältnis bei den Radialspeichen **RAS**. In der **Figur 8** sind deutlich die stabile Ausprägung des Felgenbettes **FB** und die rippenartige Ausprägung der
25 Ringspeichen **RIS** zu erkennen.

Ausführungsbeispiel 2 – Ermittlung eines Erstmodells für einen Leichtbaustoff

1. Bereitstellung der Grundparameter der zu erstellenden technischen Leichtbaustruktur in Form eines Leichtbaustoffes

Der geforderte Leichtbaustoff ist eine vollständig oder weitgehend geschlossene Schale, die ein hohes Maß an Flexibilität aufweisen sowie ein starkes Formgedächtnis haben sollte. Diese Eigenschaften müssen bei Bedarf mit einer gewissen Permeabilität gekoppelt werden können. Derartige Strukturen könnten vielfältig in der Automobilindustrie sowie in Luft- und Raumfahrt eingesetzt werden. Die Geometrie soll durch gängige oder leicht zu entwickelnde Produktionsverfahren zu verwirklichen sein. Im vorliegenden Beispiel sollen insbesondere neue Verfahren der Leichtbauweise, wie die der Herstellung von Metallschäumen und Hohlkugeln, eingesetzt werden.

2. Vorauswahl von biomineralisierten Einzellern mit passenden natürlichen Schalenarchitekturen

Aus den Organismen mit biologischen Leichtbauschalen (insbesondere planktonische, biomineralisierte Einzeller) wird die Gruppe der *Radiolarien*, speziell der Untergruppe der *Phaeodarien* selektiert, da in dieser Gruppe Arten mit Schalengeometrien vertreten sind, die die fundamentalen Voraussetzungen für eine bionische Verbesserung dieser Leichtbaustruktur erfüllen. Einzeller wie *Diatomeen* oder die ebenfalls zu den Radiolarien gehörenden *Nasselarien* kommen als Lösungsansatz für die vorliegende Problemstellung nicht in Frage, da diese eine sehr offene Architektur haben. Die **Figur 8** zeigt Raster- und Transmissionselektronenmikroskopische Darstellungen verschiedener weitgehend geschlossener Schalen von *Phaeodarien*, die sich **nicht** für die Erstellung eines Erstmodells für einen Leichtbauwerkstoff eignen.

Als besonders geeignete Geometrien werden dagegen die von Arten wie *Challengeron* identifiziert, da diese sowohl geschlossene Schalen als auch solche mit sehr kleinen Poren besitzen. Die aus produktionstechnischer Sicht aufgestellten Kriterien – der Einsatz bereits entwickelter Produktionsverfahren – können durch eine Kombination aus Hohlkörpern und Schaum zwischen massiven Deckschichten erfüllt werden. Die **Figur 9** zeigt eine Auswahl von Schalenkonstruktionen, die dem Prinzip „Hohlkugeln und Schaum zwischen massiven Schichten“ folgen. Auffällig ist, dass die Hohlkugeln meist mit speziellen Strukturen in der massiven Außenschale verankert sind.

Trotz interessanter Lösungsansätze in den Schalenstrukturen auch anderer Organismengruppen sind diese in der Regel nicht so gut für die vorliegende Problemstellung geeignet. Während viele biologische Exoskelette mit stachelartigen Fortsätzen bewehrt sind und so ihre rein defensive Schutzfunktion ergänzen, ist dies bei technischen Bauteilen in der Regel nicht erwünscht. *Phaeodarien* besitzen dagegen eine weitgehend glatte Schale, die, wie z.B. auch bei Karosserieteilen erwünscht, eine passive, defensive Form von Schutz bietet. Der Aufbau der *Phaeodarien* ist auch im Hinblick auf eine mögliche Durchlässigkeit von Interesse, die bei herkömmlichen Strukturen häufig dazu führt, dass der Aufbau für gleiche mechanische Festigkeit erheblich verstärkt wird, um sich möglicherweise ergebende Schwachpunkte zu vermeiden. Verschiedene bei den *Phaeodarien* realisierte Geometrien sind darauf ausgelegt, Spannungsspitzen in diesen Bereichen zu vermeiden.

Mikromechanische Tests („Nadeltest“, vergleiche weiter oben) wurden an antarktischen *Phaeodarien* (*Challengeron*) durchgeführt. Durch diese Tests konnten bereits generell günstige mechanische Eigenschaften der Einzellerschalen nachgewiesen werden, insbesondere lieferten die Versuche Hinweise auf ein hohes Maß an Flexibilität/Pseudoelastizität und Formgedächtnis. Da diese Eigenschaften mit größter Wahrscheinlichkeit nicht allein durch die Eigenschaften des Materials (Silikat), sondern vor allem auch durch den

spezifischen Aufbau im μm -Bereich hervorgerufen wird, ist es möglich, die Bauprinzipien auf technische Schalen aus anderen Werkstoffen zu übertragen.

3. Auswahl von Feinstrukturen der aussichtsreichsten Bereiche der vorausgewählten Schalenarchitekturen

Aus der Gesamtstruktur der *Phaeodarien* werden die internen Strukturen genauer analysiert. Auffällig ist hierbei, dass durch Vorzugsrichtungen der Elemente des zwischen den Hohlkugeln liegenden schaumartigen Materials eine höhere Festigkeit erzielt wird, als dies bei reinen isotropen Schäumen der Fall ist (vergleiche Figur 9). Die Figur 10 zeigt Details zum inneren Aufbau der Schalen der *Phaeodarien*. In der Figur 10 links und Mitte sind angelöste Schalen dargestellt, die zeigen, dass zwischen einzelnen Hohlelementen keine starre Verbindung besteht. Das völlige Fehlen einer Schaummatrix weist auf deutliche materialspezifische Unterschiede zwischen Schaum- und Hohlelementen hin. Zusätzlich sind auf der äußeren Seite der Hohlelemente Verstärkungen um die Poren herum zu sehen. In der Figur 10 rechts ist ein TEM-Schnitt dargestellt. Die Anwesenheit der Hohlkugeln verursacht eine topologische Anisotropie in der Schaummatrix.

4. Direkte Abnahme der konstruktiven Daten von den ausgewählten Feinstrukturen

Die Daten werden direkt aus licht- und rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen gewonnen und mit Hilfe von CAD- und FE- Programmen in 3D-Modelle transferiert. Die Figur 11 links zeigt ein erstes Erstmodell in der Anfangsform von Hohlkugeln in Matrix als Flächen- und Linienbild. Ausgehend von diesem 3D- Modell werden verschiedene Varianten entwickelt und mit Hilfe von FE-Analysen auf verschiedene physikalische Charakteristika getestet.

5. Skalierung der abgenommenen Daten auf die Grundparameter des Leichtbaustoffes

Die Skalierung erfolgt im Wesentlichen auf der Basis der Originalvorlage, was durch die spezifischen Ähnlichkeitsgesetze für Schalen ermöglicht wird.

5

6. Aufbereitung der skalierten Daten zu einem Satz von Erstmodelldaten für einen Leichtbaustoff

Die Aufbereitung orientiert sich an den produktionstechnischen Möglichkeiten zur Erzeugung von Prototypen und ggf. einem serientauglichen Produktionsverfahren.

10

7. Optimierung des Erstmodells

Anschließend werden die speziellen, für Leichtbaufelgen relevanten Lastfälle mit Hilfe vorgegebener Lastprogramme angewendet, um mit Hilfe von FE-Programmen und Optimierungssoftware eine letzte Anpassung des Erstmodells an die geforderten Leistungsmerkmale einer Leichtbaufelge vornehmen zu können.

15

20 Ausführungsbeispiel 3 – Ermittlung eines Erstmodells für permeable Leichtbauschale

1. Bereitstellung der Grundparameter der zu erstellenden technischen Leichtbaustruktur in Form einer permeablen Leichtbauschale

25

Die geforderte Leichtbaustruktur ist eine sehr leichte, gasdurchlässige, aber lokal und in der Gesamtstruktur stabile Schale, die im vorliegenden Fall speziell auf Computergehäuse zugeschnitten ist. Ein grundlegendes Anforderungsprofil für Computergehäuse, insbesondere von Laptops, besteht in einer Kombination von hoher Festigkeit, geringem Gewicht, geringer Geräuscentwicklung und hoher Luftdurchlässigkeit, um eine ausreichende

30

Kühlung zu gewährleisten. Insbesondere durch die Zunahme der Taktfrequenz neuer Prozessoren und Graphikchips, und des damit verbundenen Energieumsatzes wird die Wärmeproduktion der Rechner zu einem generellen Problem. Besonders extrem ist der Bedarf an diesen Eigenschaften bei

5 Laptops, deren Taktfrequenzen wegen drohender Überhitzung abgeregelt werden, da auch der Einsatz von Lüftungssystemen wegen des damit verbundenen hohen Energiebedarfs stark limitiert ist bzw. den Geräuschpegel erheblich in die Höhe treibt. Die Geometrie soll durch gängige oder leicht zu entwickelnde Produktionsverfahren zu verwirklichen sein. Im vorliegenden

10 Beispiel sollen insbesondere neue Verfahren der Leichtbauweise, wie das der Hohlkugelverwendung, eingesetzt werden.

2. Vorauswahl von biomineralisierten Einzellern mit passenden natürlichen Schalenarchitekturen

15 Aus den Organismen mit biologischen Leichtbauschalen (insbesondere planktonische, biomineralisierte Einzeller) wurde die Gruppe der Diatomeen, speziell solcher mit so genannten „loculaten Areolen“ (wabentartigen Schalenstrukturen mit oft fraktalem Porenaufbau) ausgewählt. In der **Figur 12** sind Raster- und Transmissionselektronenmikroskopische Darstellungen der

20 fraktal aufgebauten Poren von *Coscinodiscus wailesii* mit Porengrößen von 800 nm, 15 nm und 30 nm dargestellt. Die Schalen von Kieselalgen müssen aufgrund des spezifischen Selektionsdruckes genau diese Anforderungen an Stabilität und geringem Gewicht sowie Permeabilität erfüllen, wobei statt des Wärmeaustausches der Austausch von Nährstoffen und Stoffwechselpro-

25 dukten im Vordergrund steht, der aber denselben Prinzipien folgt. Dabei sind die kleinsten Poren von der Schalenaußenseite auch mit dem Rasterelektronenmikroskop oft nicht zu erkennen, also extrem klein, ohne dass sich der Diffusionswiderstand stark erhöhen darf.

Als besonders geeignete Geometrien wurden die von Arten wie *Coscinodiscus* identifiziert, da diese Schalen mit sehr kleinen, regelmäßigen und in der Größe wenig variablen Poren besitzen. Der Einsatz einer nach biologischem Vorbild hierarchisch gegliederten Porenstruktur auf der Gesamtoberfläche eines Computergehäuses (bei Bedarf inklusive der Tastatur) kann dabei einen effektiven Wärmeaustausch gewährleisten. Die aus produktionstechnischer Sicht aufgestellten Kriterien – der Einsatz bereits entwickelter Produktionsverfahren – können durch eine Kombination aus Hohlkörpern unterschiedlicher Größe erfüllt werden.

Mikromechanische Tests („Nadeltest“, vergleiche weiter oben) wurden an zentrischen Diatomeen (*Coscinodiscus* und *Thalassiosira*) durchgeführt. Durch diese Tests konnten generell günstige mechanische Eigenschaften der Schalen nachgewiesen werden, insbesondere lieferten die Versuche Hinweise auf ein hohes Maß an Steifigkeit. Da diese Eigenschaften mit durch den spezifischen Aufbau im μm -Bereich hervorgerufen wird, ist es möglich, die Bauprinzipien auf technische Schalen aus anderen Werkstoffen zu übertragen.

3. Auswahl von Feinstrukturen der aussichtsreichsten Bereiche der vorausgewählten Schalenarchitekturen

Aus der Gesamtstruktur der Diatomeen wurden ausschließlich die Poren genauer analysiert, nicht dagegen deren Anordnung, die durch die kreisförmige Gesamtoberfläche der Valve gegeben ist. Ebenfalls wurden die Randbereiche und diverse Fortsätze (Rimoportulae, Fultoportulae) der Schale nicht in die Auswahl einbezogen.

4. Direkte Abnahme der konstruktiven Daten von den ausgewählten Feinstrukturen

Die Daten wurden aus licht- und rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen gewonnen und mit Hilfe von CAD- und FE- Programmen in 3D- Modelle

(idealisierte Standardpore) transferiert. Ausgehend von diesem 3D- Modell werden verschiedene Varianten entwickelt und mit Hilfe von FE-Analysen auf verschiedene physikalische Charakteristika getestet.

5 **5. Skalierung der abgenommenen Daten auf die Grundparameter der permeablen Leichtbauschale**

Die Skalierung erfolgt im Wesentlichen auf der Basis der Originalvorlage, was durch die spezifischen Ähnlichkeitsgesetze für Schalen ermöglicht wird.

10 **6. Aufbereitung der skalierten Daten zu einem Satz von Erstmodelldaten der permeablen Leichtbauschale**

Die Aufbereitung orientiert sich an den produktionstechnischen Möglichkeiten zur Erzeugung von Prototypen und ggf. einem serientauglichen Produktionsverfahren. In der **Figur 13** ist links ein fraktales Schichtenmodell für eine realisierbare Struktur dargestellt, das in erster Näherung drei Schichten offene Hohlkugeln in einer Matrix zeigt. Die maximalen Hohlraumdurchmesser stehen in einem Verhältnis 125:5:1, z.B. 1cm, 2 mm und 400µm. In der **Figur 13** rechts ist ein Ausschnitt einer kleinsten Pore im Modell dargestellt. Zu erkennen sind der unten geöffnete Hohlkörper und die oben eingelagerten kleineren Hohlkörper mit Membranfunktion.

7. Optimierung des Erstmodells

Gegenwärtig werden insbesondere Statik und Permeabilität der Struktur mit Hilfe Von FE- Berechnungen untersucht, um eventuell durch Modifikationen die geforderten Leistungsmerkmale noch zu optimieren.

Bezugszeichenliste

	AB	Abrundung
	BO	Bohrung
5	EM	Erstmodell
	FB	Felgenbett
	FK	Felgenkörper
	KP	Kreisplatte
	RAS	Radialspeiche
10	RIS	Ringspeiche
	SA	Speichenaufbau
	ZB	zentrale Bohrung

Patentansprüche

1. Verfahren zur Ermittlung von konstruktiven Erstmodelldaten für eine
5 technische Leichtbaustruktur mit den Verfahrensschritten :
 1. Bereitstellung der relevanten Grundparameter der zu erstellenden
technischen Leichtbaustruktur in Bezug auf die technische Problemstellung,
 2. Vorauswahl von einem oder mehreren biomineralisierten Einzellern mit zu
den bereitgestellten Grundparametern passenden natürlichen Schalen-
10 architekturen,
 3. Auswahl von einer oder mehreren Feinstrukturen der für eine technische
Realisierung aussichtsreichsten Bereiche der vorausgewählten Schalen-
architekturen,
 4. direkte Abnahme der konstruktiven Daten von den ausgewählten Fein-
15 strukturen,
 5. Skalierung der abgenommenen konstruktiven Daten auf die Grund-
parameter der zu erstellenden technischen Leichtbaustruktur,
 6. Kombination und Anpassung der skalierten konstruktiven Daten zu einem
Satz von Erstmodelldaten für ein Erstmodell der zu erstellenden
20 technischen Leichtbaustruktur und
 7. Optimierung des Erstmodells.
2. Verfahren nach Anspruch 1 mit einer Ablage gemeinsamer beschreibender
Eigenschaften technischer Leichtbaustrukturen und Schalenarchitekturen
25 biomineralisierter Einzeller als organisierte Sammlung von Aspekten und
Aspektwerten in einer Datenbank.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2 mit einer Ablage einer durch ihre
bekannten Eigenschaften charakterisierten Hierarchie einzelner

Strukturelemente, größerer Unterstrukturen und ganzer Schalenarchitekturen biomineralisierter Einzellern als organisierte Sammlung in einer Datenbank.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3 mit einer direkten Abnahme
5 der konstruktiven Daten von den ausgewählten Feinstrukturen oder Unterstrukturen durch zumindest halbautomatisches mikroskopisches Scannen.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4 mit einer Ablage der direkt
abgenommenen konstruktiven Daten als organisierte Sammlung in einer
10 Datenbank.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5 mit einer Ablage von Kriterien
für die Skalierung, die Kombination und die Anpassung der konstruktiven
Daten, von Erstmodellen und deren Optimierungsergebnissen als organisierte
15 Sammlung in einer Datenbank.

7. Anwendung eines Verfahrens zur Ermittlung von konstruktiven
Erstmodelldaten für eine technische Leichtbaustruktur, insbesondere nach
einem der Ansprüche 1 bis 6, zur Erzeugung eines Erstmodells für eine
20 Leichtbaufolge,
gekennzeichnet durch die Vorauswahl von *Arachnoidiscus* oder
Coscinodiscus aus der Gruppe der Diatomeen als biomineralisierter Einzeller.

8. Anwendung eines Verfahrens zur Ermittlung von konstruktiven
25 Erstmodelldaten für eine technische Leichtbaustruktur, insbesondere nach
einem der Ansprüche 1 bis 6, zur Erzeugung eines Erstmodells für einen
Leichtbaustoff,
gekennzeichnet durch die Vorauswahl von *Phaeodarien* aus der Gruppe der
Radiolarien als biomineralisierte Einzeller.

9. Mit einem Verfahren zur Ermittlung von konstruktiven Erstmodelldaten für eine technische Leichtbaustruktur, insbesondere nach einem der Ansprüche 1 bis 6, erzeugtes Erstmodell für eine Leichtbaufelge (LF) für ein Kraftfahrzeug mit einem einseitig an einer Achse befestigbaren inneren Felgenkörper (FK) und mit einem damit verbundenen äußeren Felgenbett (FB), wobei der Felgenkörper (FK) einen tragenden Speichenaufbau (SA) aufweist, **gekennzeichnet durch** eine hochsymmetrische Ausprägung des Speichenaufbaus (SA) aus mehreren rippenartigen Radialspeichen (RAS) mit einem hohen Aspektverhältnis von Breite zu Tiefe und mehreren konzentrischen rippenartigen Ringspeichen (RIS), wobei sich einige radiale Radialspeichen (RAS) nur jeweils über ein Drittel des Felgenkörpers (FK) vom Felgenbett (FB) her erstrecken und an einer Ringspeiche (RIS) enden.

10. Erstmodell nach Anspruch 9, **gekennzeichnet durch** ein geringeres Aspektverhältnis der Ringspeichen (RIS) gegenüber dem Aspektverhältnis der Radialspeichen (RAS), wobei die Ringspeichen (RIS) mit den Radialspeichen (RAS) auf der Vorderseite bündig oder nahezu bündig verlaufen.

11. Erstmodell nach Anspruch 9 oder 10, **gekennzeichnet durch** 16 Radialspeichen (RAS) und 6 Ringspeichen (RIS), wobei jede zweite Radialspeiche (RAS) nur bis zur zweiten Ringspeiche (RIS) vom Felgenbett (FB) aus verläuft.

12. Erstmodell nach einem der Ansprüche 9 bis 11, **gekennzeichnet durch** Abrundungen (AB) zwischen den Radialspeichen (RAS) auf der Seite des Felgenbettes (FB).

13. Erstmodell nach einem der Ansprüche 9 bis 12,
gekennzeichnet durch eine konzentrische Kreisplatte (KP) im Bereich der
Achsbelegung des Felgenkörpers (FK), in die die Radialspeichen (RAS)
5 auslaufen.

1/7

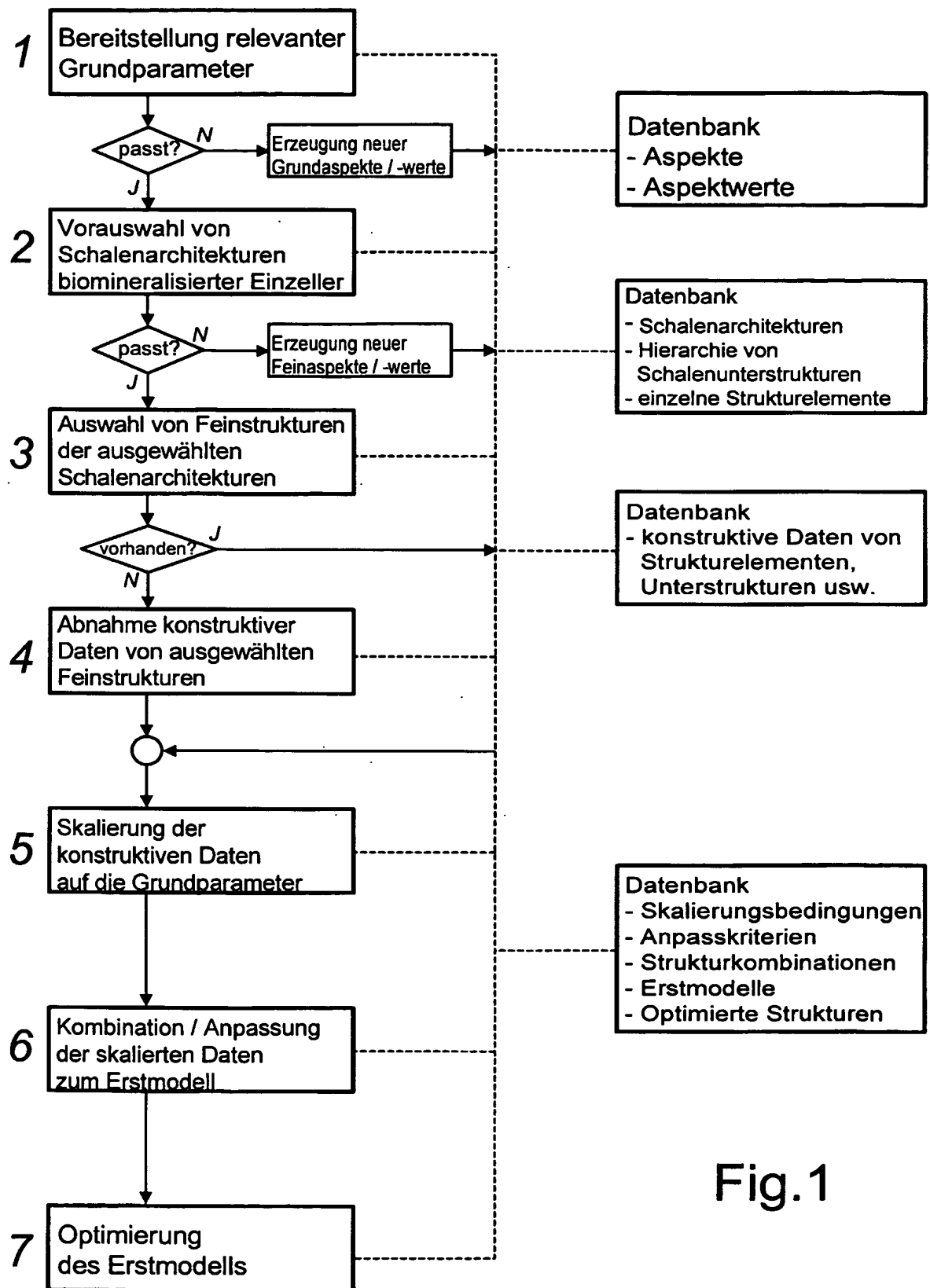
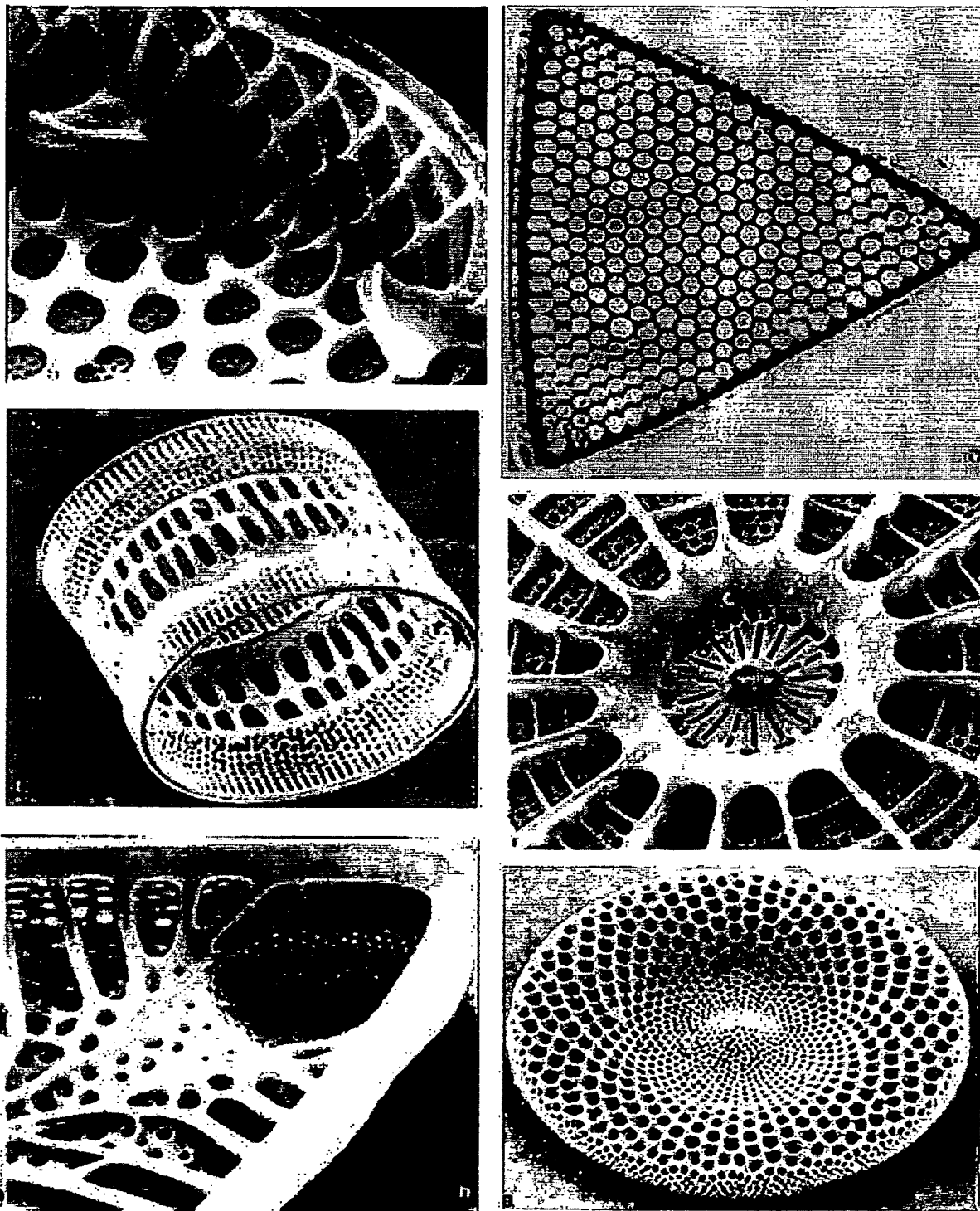


Fig.1

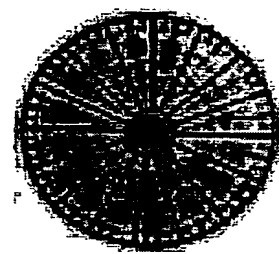
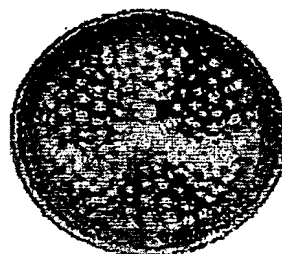
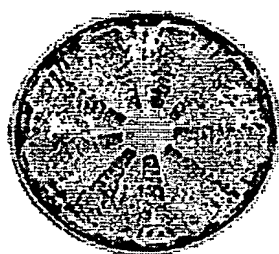
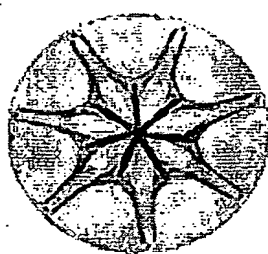
2/7



Stand der Technik

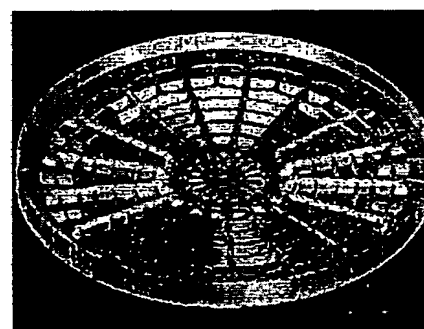
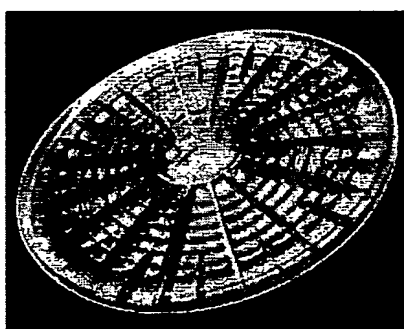
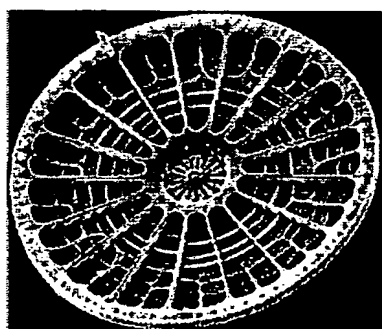
Fig.2

3/7



Stand der Technik

Fig.3



Stand der Technik

Fig.4

4/7

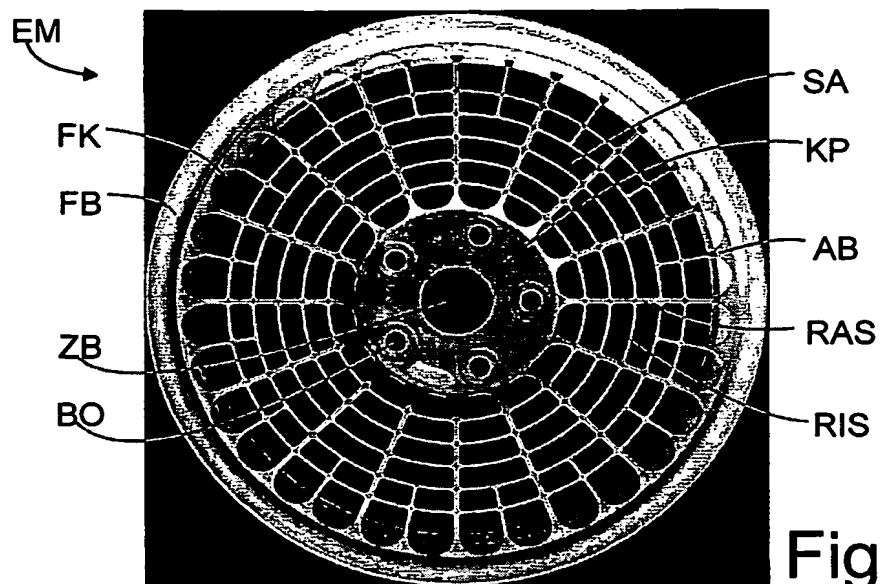


Fig.5

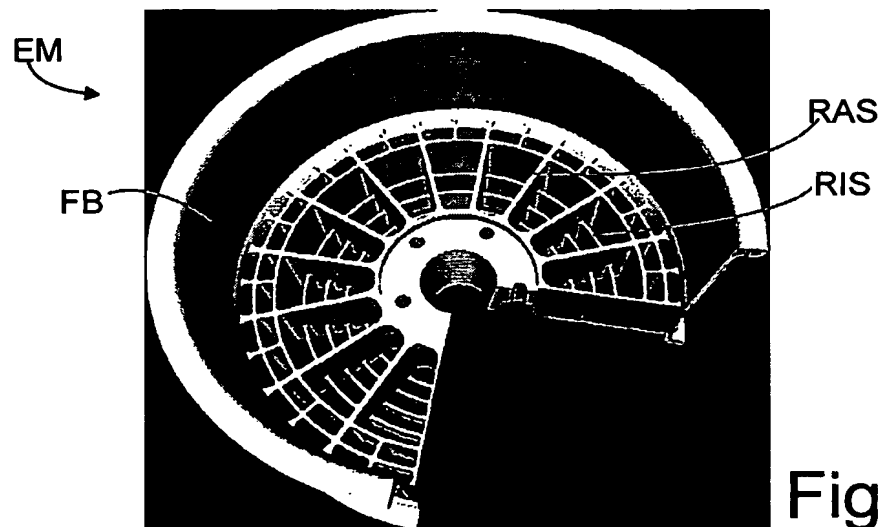


Fig.6

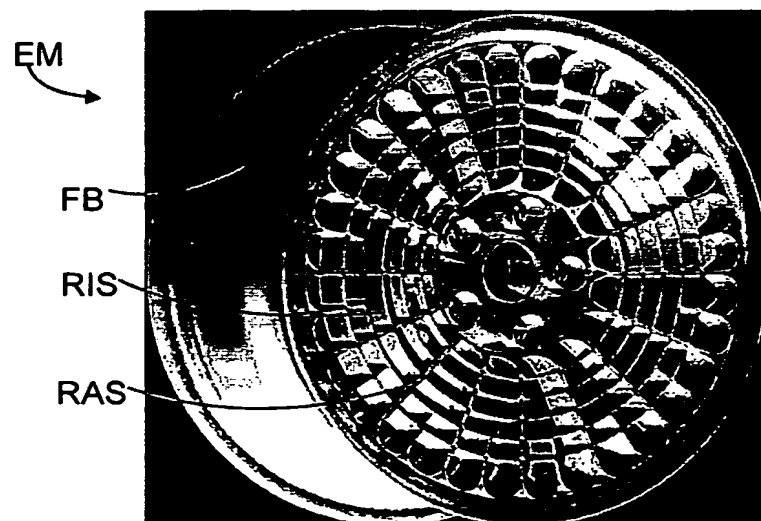
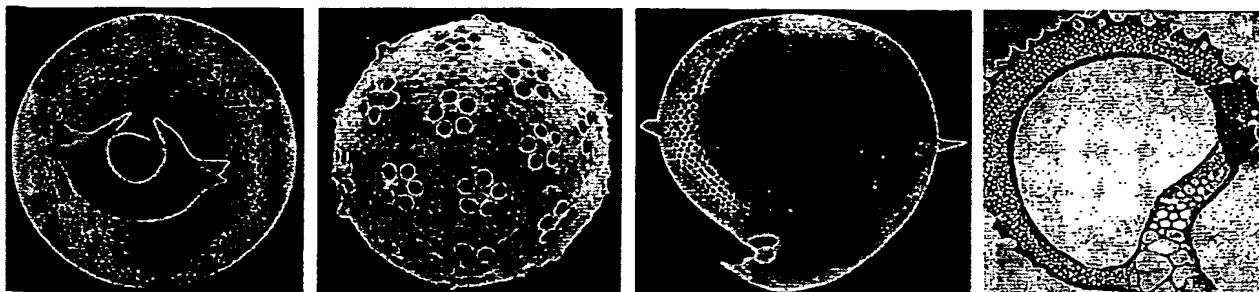


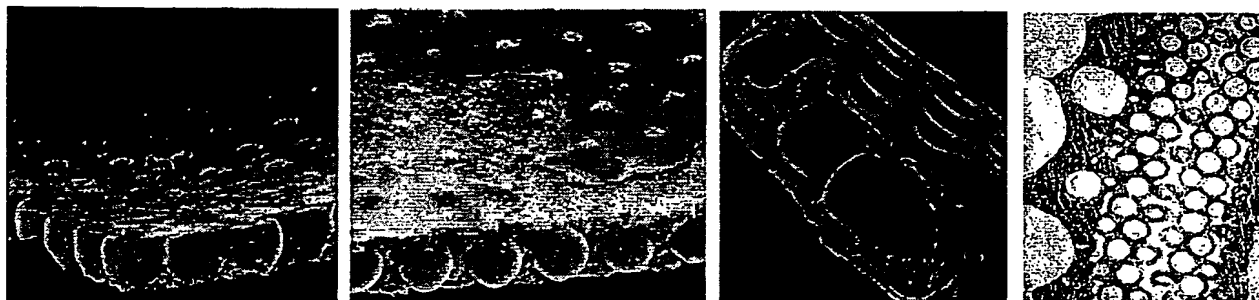
Fig.7

5/7



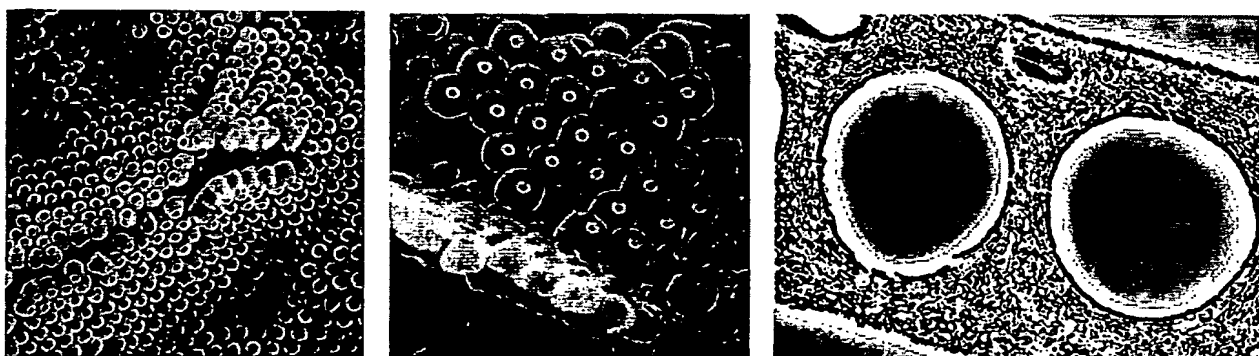
Stand der Technik

Fig.8



Stand der Technik

Fig.9



Stand der Technik

Fig.10

6/7

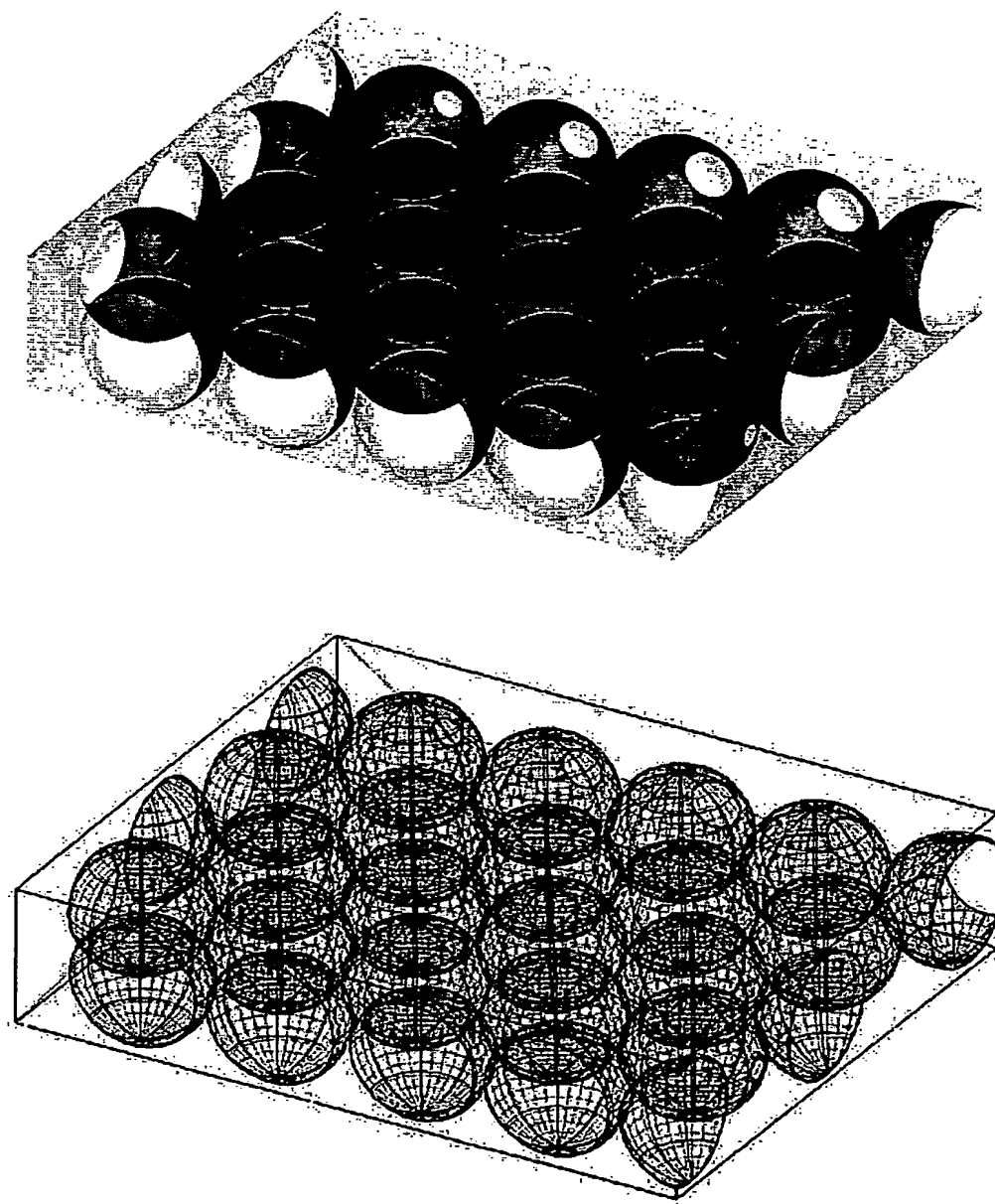
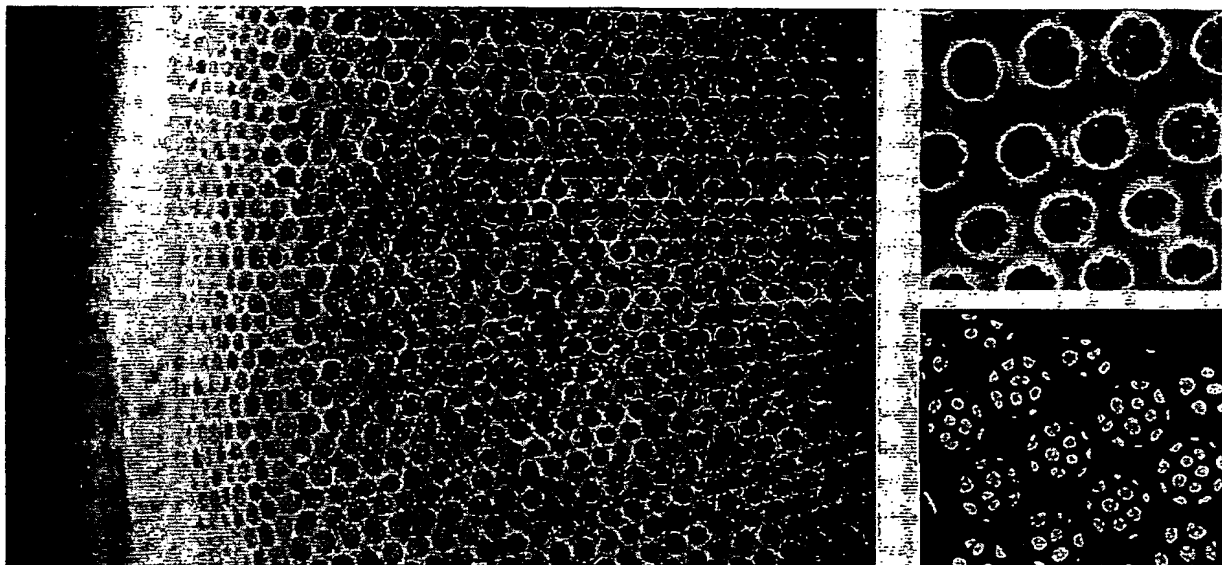


Fig.11

7/7



Stand der Technik

Fig.12

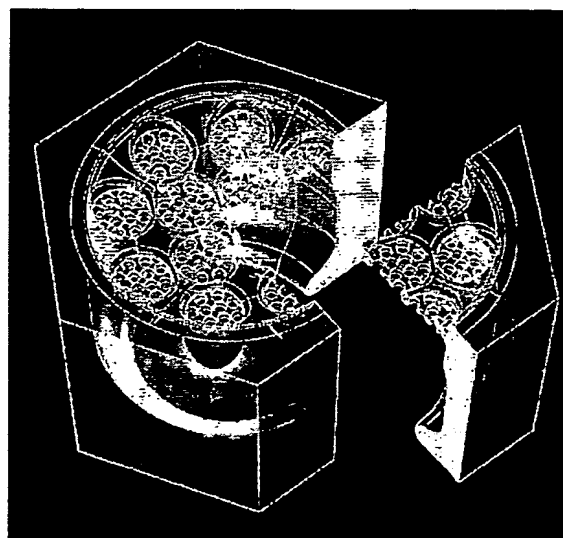
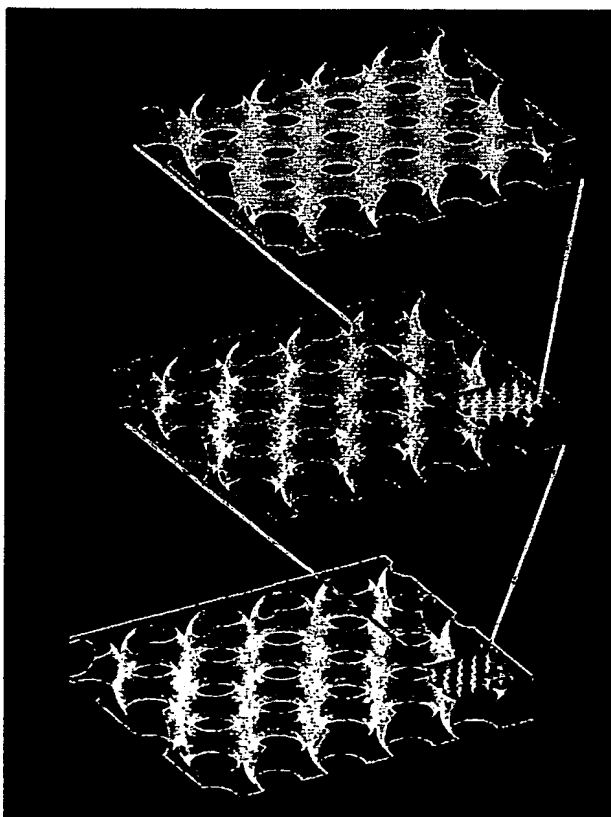


Fig.13

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☒ **BLACK BORDERS**
- ☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- ☐ **FADED TEXT OR DRAWING**
- ☐ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- ☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- ☒ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- ☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**
- ☐ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- ☐ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- ☐ **OTHER:** _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.